

第5章 フィールド検証実験

5.1 緒言

フィールド検証実験では、3章までの研究成果に基づき構築・試作したEM-MWDシステムを用いて、実用掘削環境におけるセンサ情報の伝送性能を評価し、実用の可能性を明らかにする。ちなみに、2章と3章で述べたフィールド実験では坑底機器の電源供給は地上から有線で供給するか、内臓バッテリーを用いたため、大深度・長時間の実験は不可能であった。これに対して、本章で述べるフィールド実験では坑底機器の電源にマッド流で起動するタービン発電機を用いているので長時間の実験が可能になることは勿論のこととして、掘削もできる実用機モデルである。

第1回目の検証実験は、超低周波電磁波の地中伝送特性、変復調とノイズ低減に関する信号処理の性能を検証する。この実験では坑井の掘削は行わないが、坑井の崩壊を予防するためマッドの循環は掘削中と同じ条件で行い、坑井の崩壊を早期に検知するためドリルパイプは通常の回転速度より低速（通常の約1/10）で回転させていることとビットに荷重が加わらない以外は実掘削条件とほぼ同一である。

次に、実掘削のドリルパイプ編成に本研究で試作したEM-MWD機器と海外より購入したドリルカラー一体構造のセンサ（センササブと呼ぶ）を組み込み、実際に坑井を掘削しながら、坑底センサで計測した坑底情報を地上に伝送する総合評価実験を行った。本実験では、試作した機器の耐久試験、システムの機能評価試験なども実施したが本研究の主題でないので割愛する。

さらに、大深度での情報伝送を実現するため搬送周波数に1Hzを用いた伝送実験を行った。これらの実験により、開発したEM-MWDシステムの実用の可能性を明らかにする。

なお、本章では主に「基礎試錐・三島」、「基礎試錐・新竹野町」および「基礎試錐・富倉」での実験内容と成果について述べるが、評価においては、上記フィールドに先立ち予備調査実験を実施した「基礎試錐・東頸城」、石油公団所有テストフィールド¹⁾（略称：TRC-RW1およびTRC-RW2）で得られた実験成果も交えて考察する。

5.2 電磁波伝送性能の評価実験

5.2.1 目的

電磁波の地中伝送特性、適応型ノイズキャンセラ、変復調器およびこれらを組み合わせた情報伝送性能をシミュレーション結果と比較し、シミュレーションの妥当性と電磁波伝送方式の実用性の可能性を明らかにする。なお、本実験は「基礎試錐・三島」で実施した。

5.2.2 実験方法

(1) ノイズ調査とノイズキャンセル実験

掘削リグの設置エリアに受信アンテナを設置し、実用深度を掘削しているときの受信アンテナに混入するノイズの特性を調査すると共に、適応型ノイズキャンセラ（ANC：Adaptive Noise Canceller）を動作させてノイズのキャンセル量を求める。適応型ノイズキャンセラは3章で述べたように適応フィルタ（ADF：Adaptive Filter）を用いて構成し、図5.1に示すような1つの主入力に対して2つの参照入力の3入力適応型ノイズキャンセラを用いる^{2,3}。主入力には受信アンテナの出力信号を、参照入力にはケーシングパイプを流れる電流信号と地電流信号を入力する。ケーシングパイプを流れる電流検出は、4章で説明した内径1mの大型の変流器（CT：Current Transformer）で構成するノイズ参照信号検出器（略称PCT：Pipe-CT）を用いる。地電流の検出はケーシングパイプを中心に対象配置した地中埋設電極を用い（図4.5参照）地電位の差動成分を検出する。この地中埋設電極の配置で、ケーシングパイプから大地に流れる電流信号成分および坑底からの伝送信号成分を除いたノイズ信号成分を検出する。ただし、ケーシングパイプを流れるノイズ電流の地表面での分布は第3章の図3.26に示すように必ずしもケーシングパイプを中心に均等に分布していないのでケーシングパイプを流れる電流も混入し、地電流のみを抽出する効果は十分期待できない可能性があるが、実験でその効果を検証する。

この3入力適応型ノイズキャンセラは1～15Hz帯域での受信アンテナに混入するノイズとケーシングパイプを流れる電流とのコヒーレンス関数²が小さく、ノイズキャンセル効果が期待できないので新たに準備したものである。

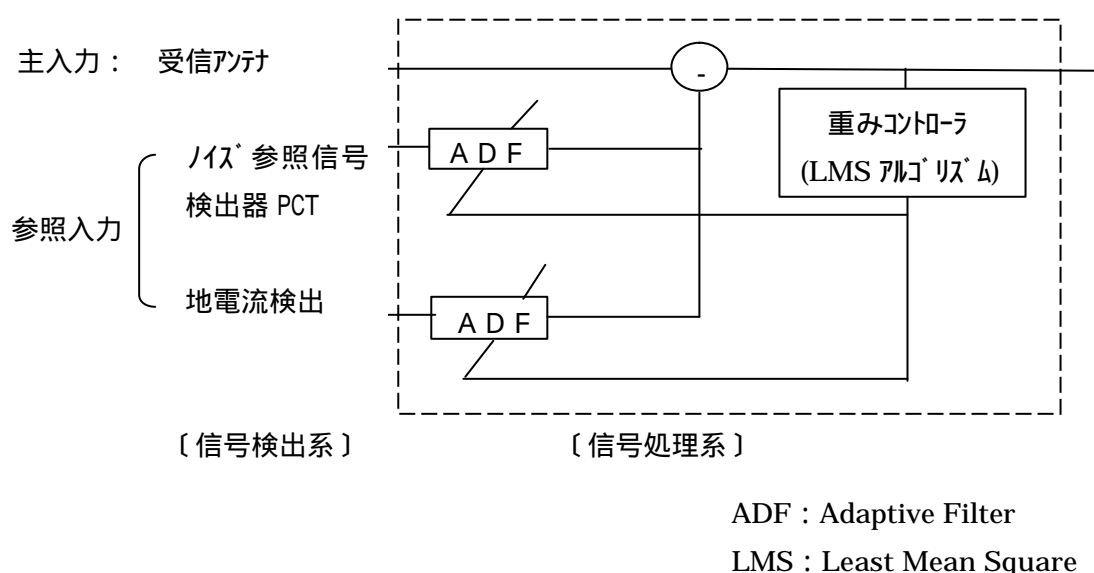


図5.1 3入力適応型ノイズキャンセラの構成

(2) 伝送実験方法

掘削時と同じドリルカラー編成の坑底機器をあらかじめ掘削された裸坑の目標深度まで降管する。その後、地上のマッドポンプを作動させ坑井内でマッド循環を行い、マッドタービンを回転駆動させる。マッドタービンが一定の回転速度に達するとマッドタービン軸に直結されている発電機が同期回転し発電を開始する。これにより坑底機器の電源が作動し、定格電圧になると電子機器が動作モードになり、図5.2に示すように、あらかじめ設定した送信フォーマットの変調波を送信する。

搬送周波数は、図5.3に示すようにマッドポンプのON/OFFの繰り返しサイクルに従って、3Hz、5Hz、10Hz、20Hz、30Hzと順次変更される。

地上機器は、マッドの循環が開始されると復調処理の待機モードになり復調処理を開始する。伝送信号の搬送周波数は、マッドポンプのON/OFF動作に合わせてプログラム手順に従い自動的に切り替わるので、地上機器も同様に受信帯域を切り替える。

伝送実験は深度830m、1275m、3300mの3点で行った。適応型ノイズキャンセラの性能評価実験は、上記伝送実験時の他に、深度2270mおよび3450m付近を実際に掘削している時にも行った。

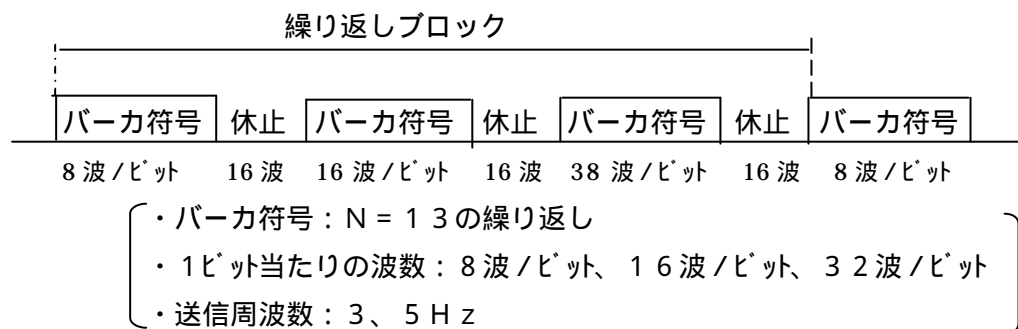


図5.2 テスト信号の送信フォーマット

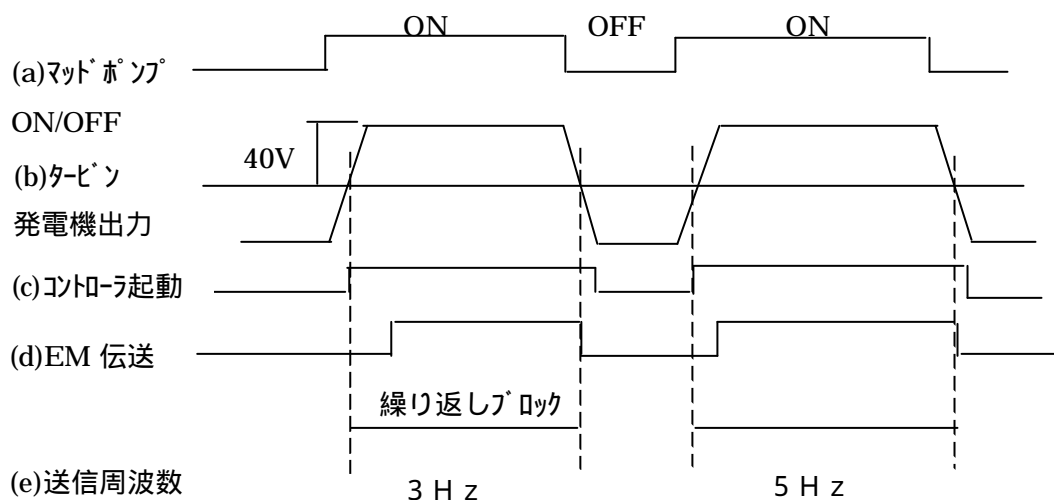


図5.3 周波数変更シーケンス

(3) 伝送性能の評価方法

電磁波の地中伝送特性は地上での受信信号レベルで評価する。受信信号レベルは、図 5 . 2 に示すバーカ符号を用いた同期信号を圧縮処理し S N 比を高めた後の信号の振幅より求める。復調性能は、予めプログラムされ分かっている坑底からの伝送データと地上の復調結果のビット単位での認識率（合致率）で評価する。適応型ノイズキャンセラの性能評価実験は実掘削時と電磁波信号を伝送している時に行う。ノイズキャンセル性能は、電磁波信号を伝送していない実掘削時における適応型ノイズキャンセラの入出力ノイズレベルの低減量で評価した。

5 . 2 . 3 実験結果

(1) ノイズ調査とノイズキャンセル実験

深度 2 2 7 0 m および 3 4 5 0 m を実掘削している時に、ノイズ特性の調査とノイズキャンセル実験を行った。受信アンプでは送信周波数に応じて帯域の異なるバンドパスフィルタで通過周波数帯域を制限しノイズ成分を低減している。以下では、上記バンドパスフィルタ通過後のノイズの特性およびノイズキャンセル結果について述べる。

(a) 2 0 ~ 4 0 H z 帯域

ノイズキャンセル実験の結果の一例を図 5 . 4 に、このときのキャンセル量を表 5 . 1 に示す。また、受信アンテナおよびノイズ参照信号検出器（PCT）で観測した掘削中のノイズのパワースペクトル密度と両信号のコヒーレンス関数²の一例を図 5 . 5 に示す。帯域内のコヒーレンス関数²は約 0 . 9 4 でノイズキャンセル量は約 1 5 d B で期待どおりの結果が得られた。

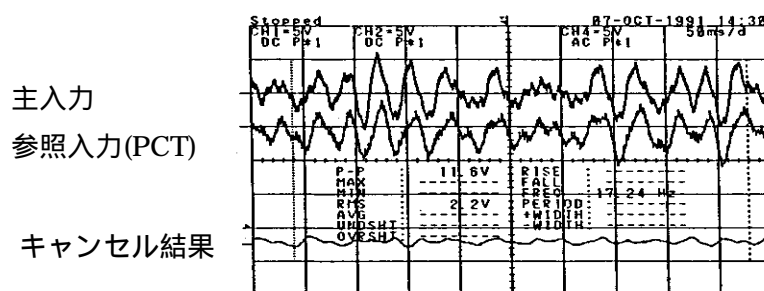
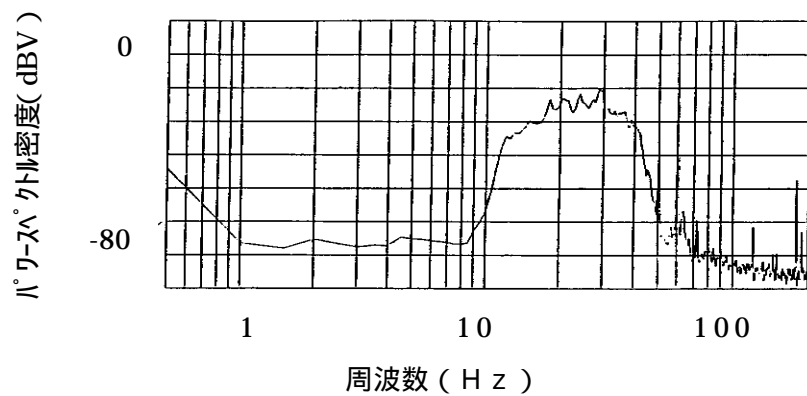


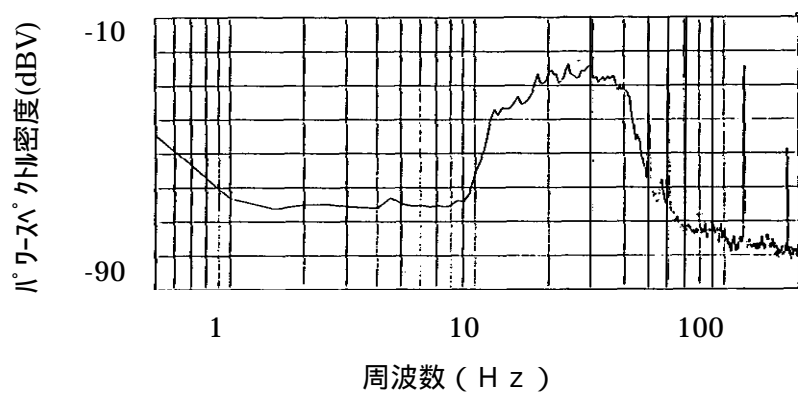
図 5 . 4 ノイズキャンセル実験の結果の一例

表 5 . 1 ノイズキャンセル結果

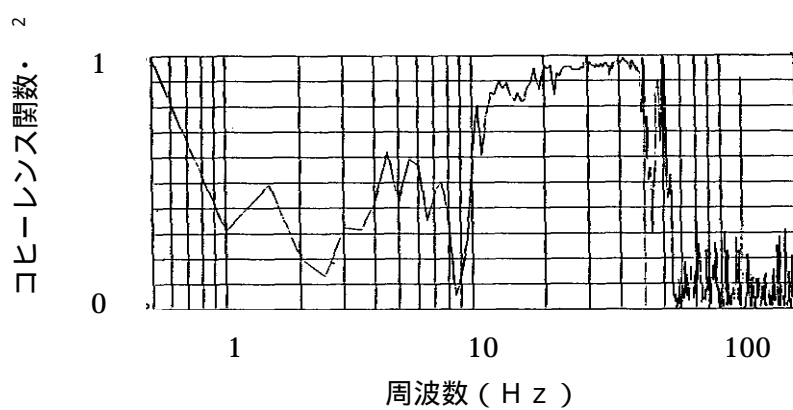
A N C 主入力 (V _{rms})	2 . 2
A N C 出力 (V _{rms})	0 . 4
ノイズキャンセル量 (d B)	1 4 . 8
コヒーレンス関数 ²	0 . 9 4



(a) 受信アンテナで観測したノイズのパワースペクトル密度



(b) ノイズ参照信号検出器 (PCT) で観測したノイズのパワースペクトル密度



(c) コヒーレンス関数

図5.5 受信アンテナとノイズ参照信号検出器 (PCT) で観測したノイズの
パワースペクトル密度とコヒーレンス関数 (掘削深度 2270 m)

(b) 7 ~ 3 0 H z 帯域

ノイズキャンセル実験の結果の一例を図 5 . 6 に、このときのノイズキャンセル量を表 5 . 2 に示す。また、受信アンテナおよびノイズ参照信号検出器 (P C T) で観測した掘削中のノイズのパワースペクトル密度と両信号のコヒーレンス関数 ² を図 5 . 7 に示す。コヒーレンス関数 ² およびノイズキャンセル量は (a) 項の 2 0 ~ 4 0 H z 帯域と同等で、良好なノイズキャンセル量である。

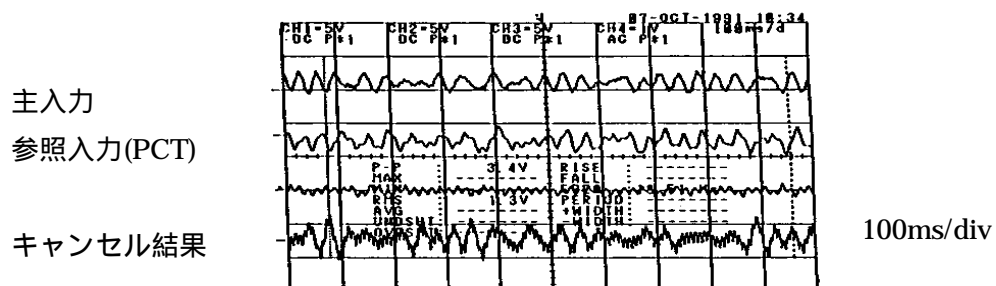
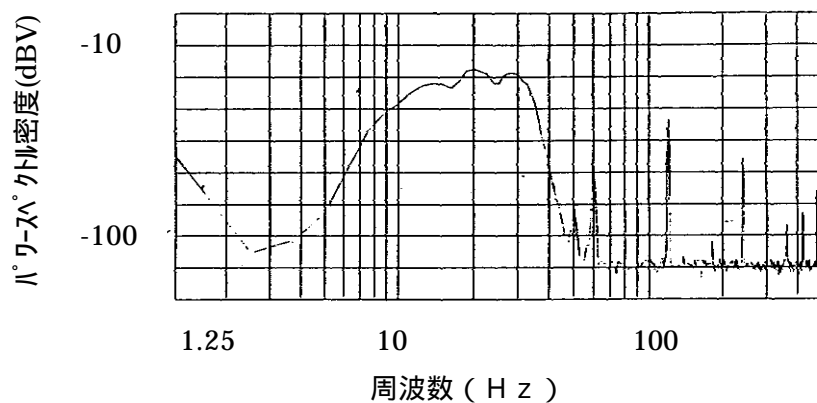


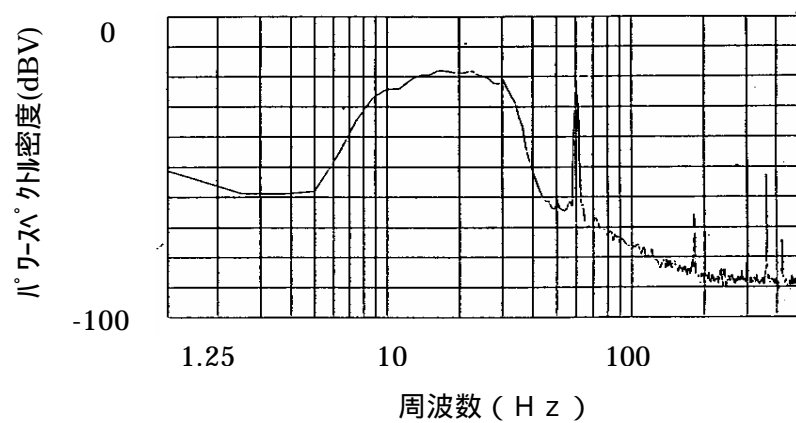
図 5 . 6 ノイズキャンセル実験の結果の一例

表 5 . 2 ノイズキャンセル結果

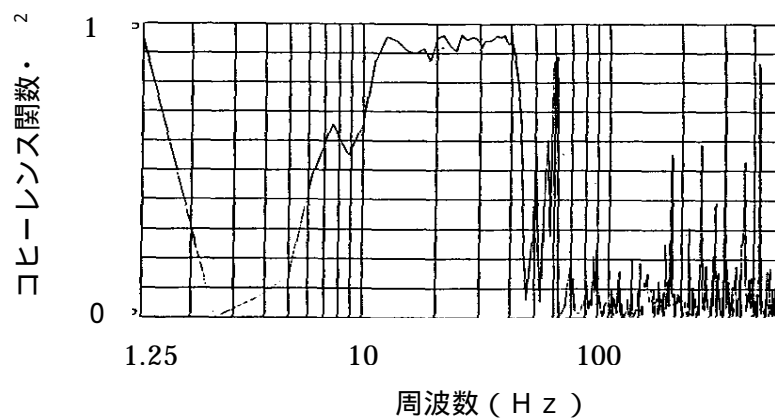
A N C 主入力 (V_{rms})	1 . 3
A N C 出力 (V_{rms})	0 . 2
ノイズキャンセル量 (d B)	1 5 . 4
コヒーレンス関数 ²	0 . 9 4



(a) 受信アンテナで観測したノイズのパワースペクトル密度



(b) ノイズ参照信号検出器 (P C T) で観測したノイズのパワースペクトル密度



(c) コヒーレンス関数 ²

図 5 . 7 受信アンテナとノイズ参照信号検出器 (P C T) で観測したノイズの
パワースペクトル密度とコヒーレンス関数 ² (掘削深度 2 2 7 0 m)

(c) 1 ~ 15 Hz 帯域

ノイズ調査

観測した掘削中のノイズ信号波形の一例を図5.8に示す。受信アンテナとノイズ参照信号検出器(PCT)の出力信号のパワースペクトル密度とコヒーレンス関数²を図5.9に示す。周波数帯域内でのコヒーレンス関数²は小さく、概ね、0.47である。この結果より、10 Hz以下の周波数帯域になると受信アンテナとノイズ参照信号検出器(PCT)の信号のコヒーレンス関数²が小さく、上記の20 ~ 40 Hz 帯域および7 ~ 30 Hz 帯域の様なノイズキャンセル効果が得られないことが分かった。

そこで、ノイズ参照信号に大地を流れる地電流を加えた3入力方式のノイズキャンセルの可能性を検討する。地電流のパワースペクトル密度を図5.10(a)に受信アンテナに混入するノイズとのコヒーレンス関数²を図5.10(b)に示す。同図によると、3、5、7、9 Hzの奇数次の狭帯域にコヒーレンス関数²の高い値が見られノイズキャンセル効果期待できるが、帯域全体でのノイズキャンセルは期待できないことが分かる。また、ノイズ参照信号検出器(PCT)と地電流のコヒーレンス関数²(図5.11)および受信アンテナに混入するノイズからノイズ参照信号検出器(PCT)で検出したノイズ成分をキャンセルした残りのノイズ成分と地電流ノイズとのコヒーレンス関数²(図5.12)も同様に小さい。以上のことから、今回の実験では地電流を加えた3入力型のノイズキャンセル方式は大きな効果が期待できないことが分かった。本実験において、地電流検出アンテナで地電流成分のみを検出できていることの確証がないので今後のフィールド実験で追試していくことにする。

ノイズキャンセル実験

ノイズキャンセル量を定量化するため、ノイズキャンセル実験を行った。まず地電流ノイズを用いない2入力の適応型ノイズキャンセラのキャンセル結果を図5.13、表5.3に示す。コヒーレンス関数²は約0.47でキャンセル量は9 dB程度である。

次に地電流ノイズ成分を加えた3入力の適応型ノイズキャンセラのキャンセル結果を図5.14、表5.4に示す。このときのキャンセル量は13 dBで、若干の改善は見られる。

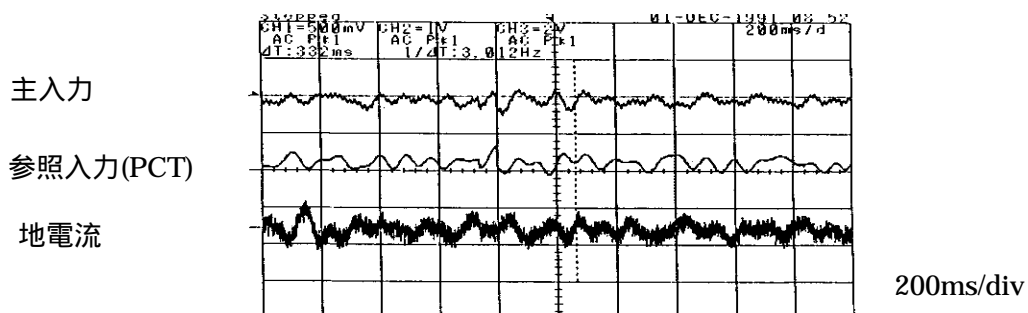
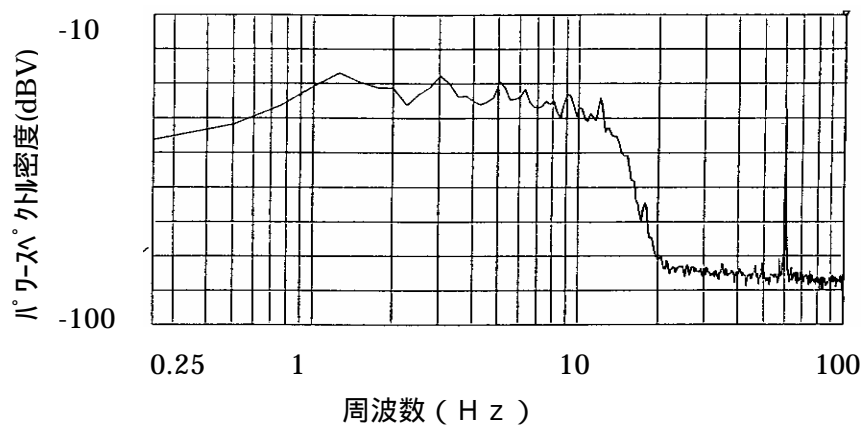
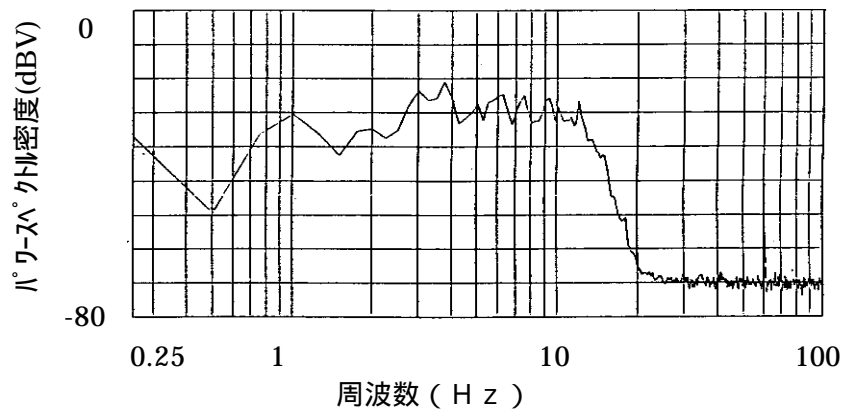


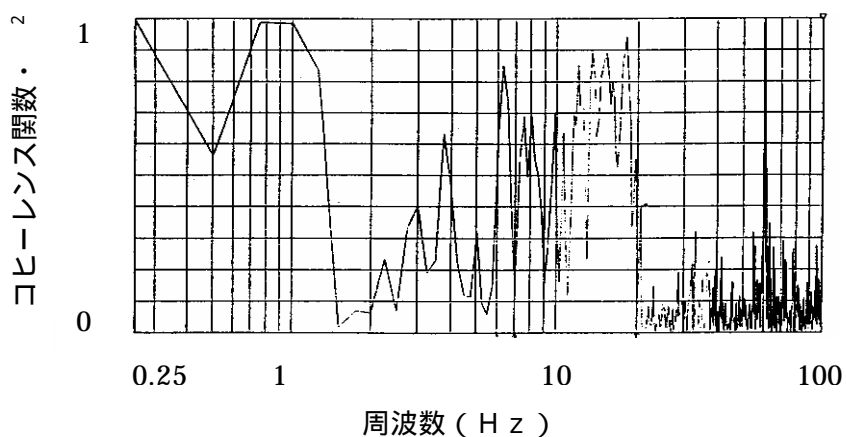
図5.8 掘削中のノイズ波形(掘削深度: 3450m)



(a) 受信アンテナで観測したノイズのパワースペクトル密度

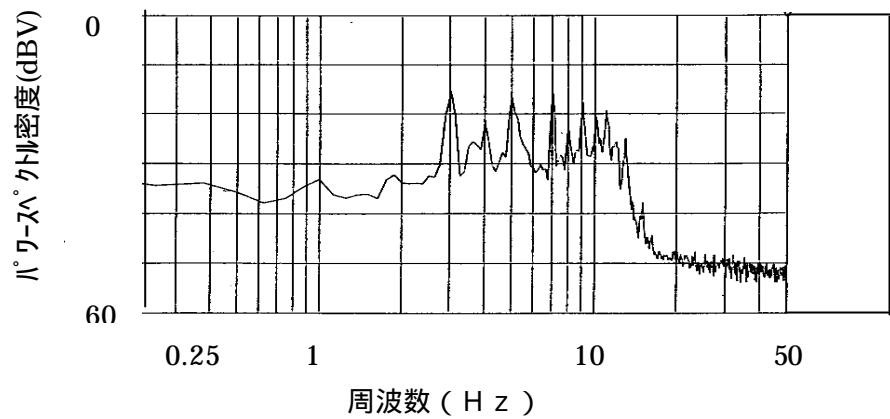


(b) ノイズ参照信号検出器 (P C T) で観測したノイズのパワースペクトル密度

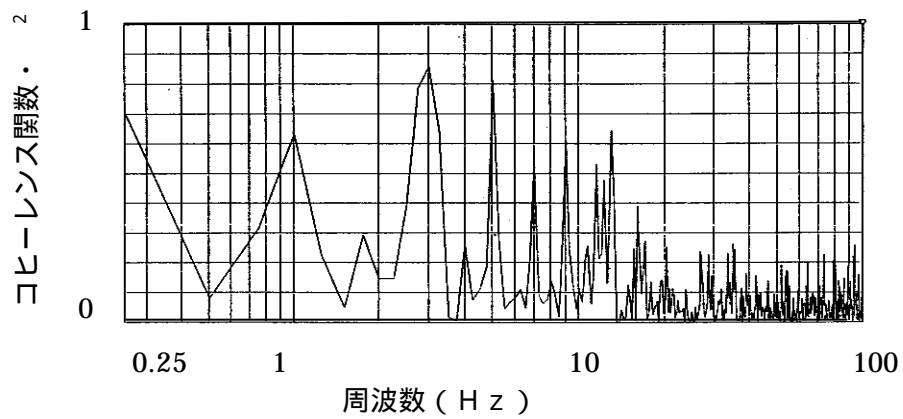


(c) コヒーレンス関数 ²

図 5 . 9 受信アンテナとノイズ参照信号検出器 (P C T) で観測したノイズの
パワースペクトル密度とコヒーレンス関数 ² (掘削深度 3 4 5 0 m)



(a) 地電流ノイズの周波数スペクトル密度の一例



(b) コヒーレンス関数²

図5.10 受信アンテナと地電流ノイズのパワースペクトル密度とコヒーレンス関数²

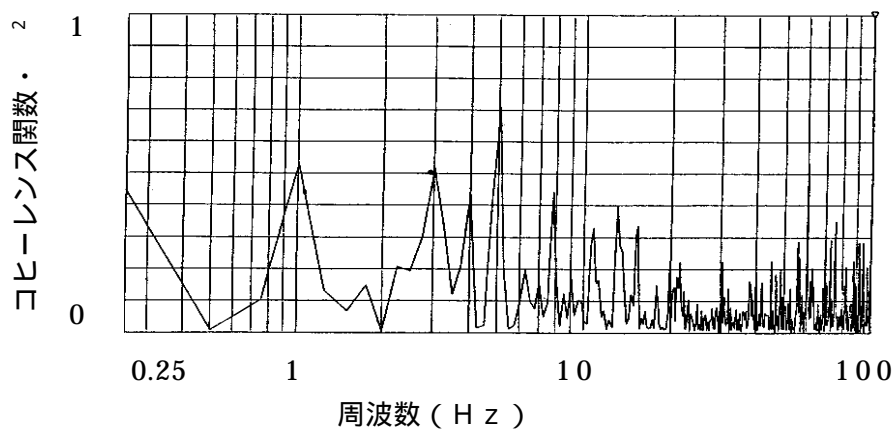


図5.11 ノイズ参照信号検出器(PCT)と地電流のコヒーレンス関数²

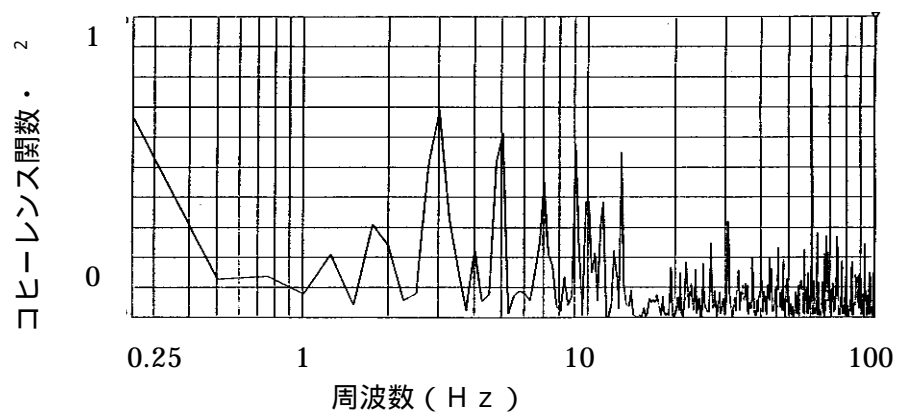


図5．12 受信アンテナノイズをノイズ参照信号検出器（PCT）ノイズでキャンセルした後のノイズと地電流ノイズのコヒーレンス関数²

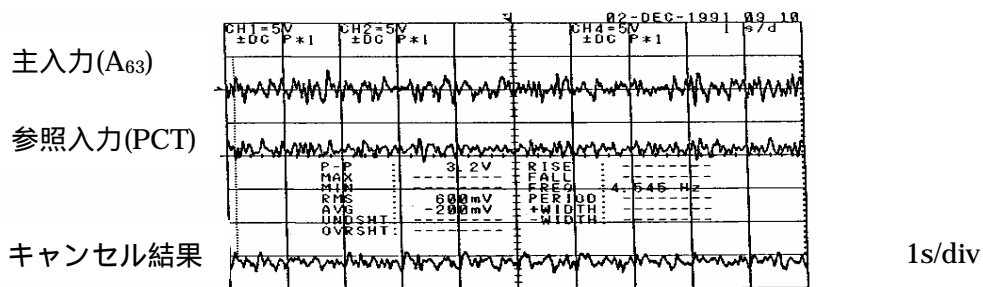


図5．13 2入力適応型ノイズキャンセラ実験の結果（周波数帯域：1～15Hz）

表5．3 2入力適応型ノイズキャンセラの結果（周波数帯域：1～15Hz）

ANC主入力（V _{rms} ）	3.1
ANC出力（V _{rms} ）	1.1
ノイズキャンセル量（dB）	8.9
コヒーレンス関数 ²	0.47

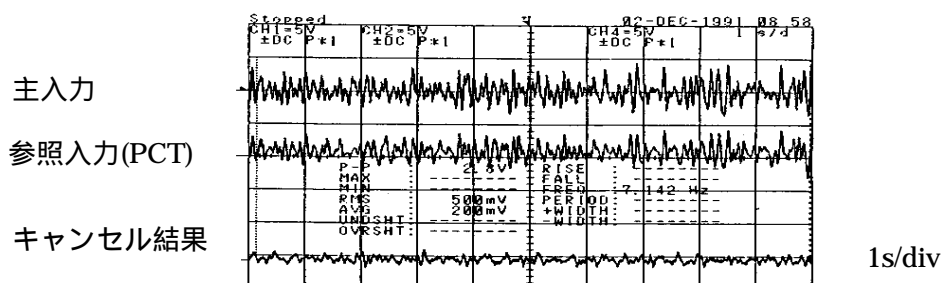


図5．14 3入力適応型ノイズキャンセラ実験の結果（周波数帯域：1～15Hz）

表 5 . 4 3 入力適応型ノイズキャンセラの結果 (周波数帯域 : 1 ~ 1 5 Hz)

A N C 主入力 (V_{rms})	1 . 4
A N C 出力 (V_{rms})	0 . 3
ノイズキャンセル量 (d B)	1 3 . 4
コヒーレンス関数 ²	0 . 5 8

(d) ノイズキャンセル実験のまとめ

実験の結果を表 5 . 5 にまとめる。同表に復調が可能な受信信号レベルの推定値を示す。この推定値によると、受信信号レベルが $20 \sim 30 \mu V_{rms}$ 以上あれば受信が可能となる。復調可能な受信信号レベルは、適応型ノイズキャンセラのノイズキャンセル量と復調器の復調限界 (1 6 波 / ビットの時の S N 比は - 3 d B) の和をノイズの低減量とし、式 (5 . 1) で求めた。

$$\left(\begin{array}{l} \text{受信可能な受信} \\ \text{信号レベル} \end{array} \right) = \frac{(\text{ノイズレベル})}{\{(\text{ノイズキャンセル量}) - (\text{復調限界の S N 比}(-3\text{dB 相当}))\}} \dots (5 . 1)$$

また、図 5 . 1 5、1 6 に 2 2 7 0 m および 3 4 5 0 m 掘削時の受信アンテナで観測したノイズレベル、ノイズキャンセル処理後のノイズレベルおよび復調可能な受信信号のレベルを示した。低周波数帯域になるほどノイズキャンセル効果が期待できないことが分かる。また、地電流を加えた 3 入力方式のノイズキャンセルの効果が期待できないことが分かった。今後のフィールド実験で追試していく必要がある。

ノイズキャンセル量とコヒーレンス関数 ² の関係を図 5 . 1 7 に示す。この結果は、第 3 章で示したノイズキャンセル性能の評価結果と同等の結果が得られ実用性がさらに検証できた。

表 5 . 5 ノイズキャンセル実験のまとめ

バンドパスフィルタの周波数帯域 (H z)	実験深度 (m)	ノイズレベル		ノイズキャンセル量 (d B)	復調可能な受信信号レベル (μV_{rms})
		ピーク値 (V_{p-p})	実効値 (V_{rms})		
BPF1 : 20 ~ 40	2270	810	170	15 ~ 16	21 ~ 19
	3450	748	119	15 ~ 16	15 ~ 14
BPF2 : 7 ~ 30	2270	945	200	15 ~ 16	25 ~ 22
	3450	485	75	13 ~ 16	12 ~ 9
BPF3 : 1 ~ 15	2270	700	150	5 ~ 9	59 ~ 38
	3450	414	56	4 ~ 7	25 ~ 18
	3450	414	56	10 ~ 13	13 ~ 10*)

*) 受信アンテナ、PCT、地電流の 3 入力でノイズキャンセルした。

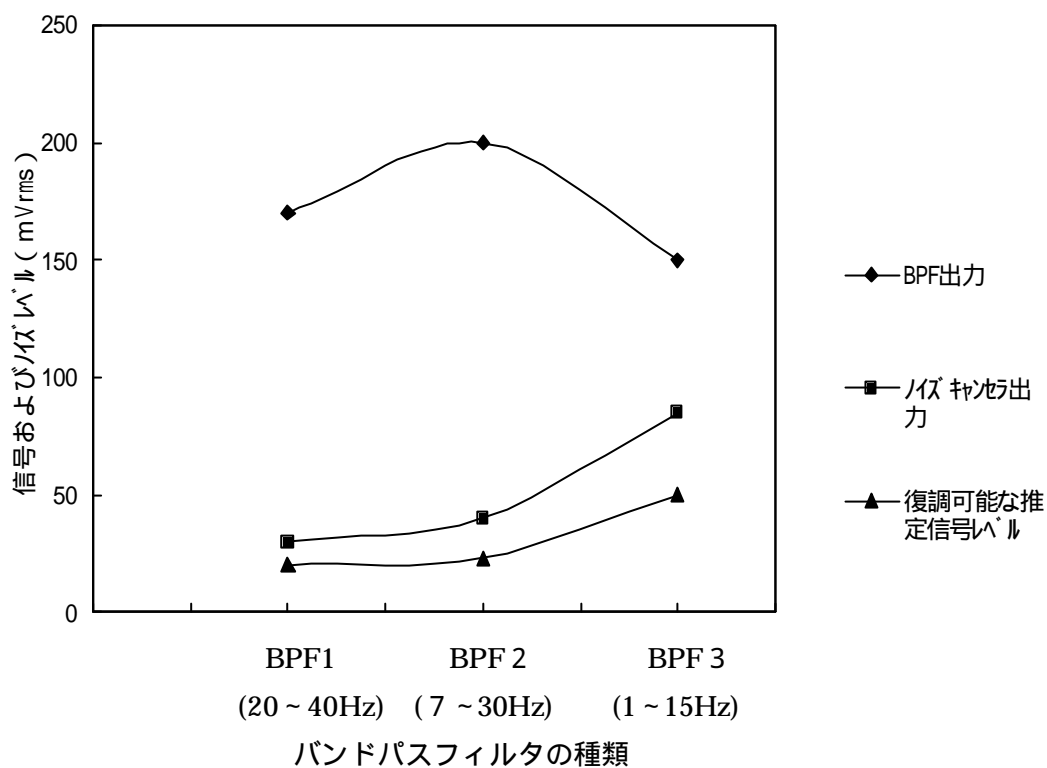


図 5 . 1 5 2 2 7 0 m掘削時のノイズキャンセル効果と復調可能な信号レベルの推定

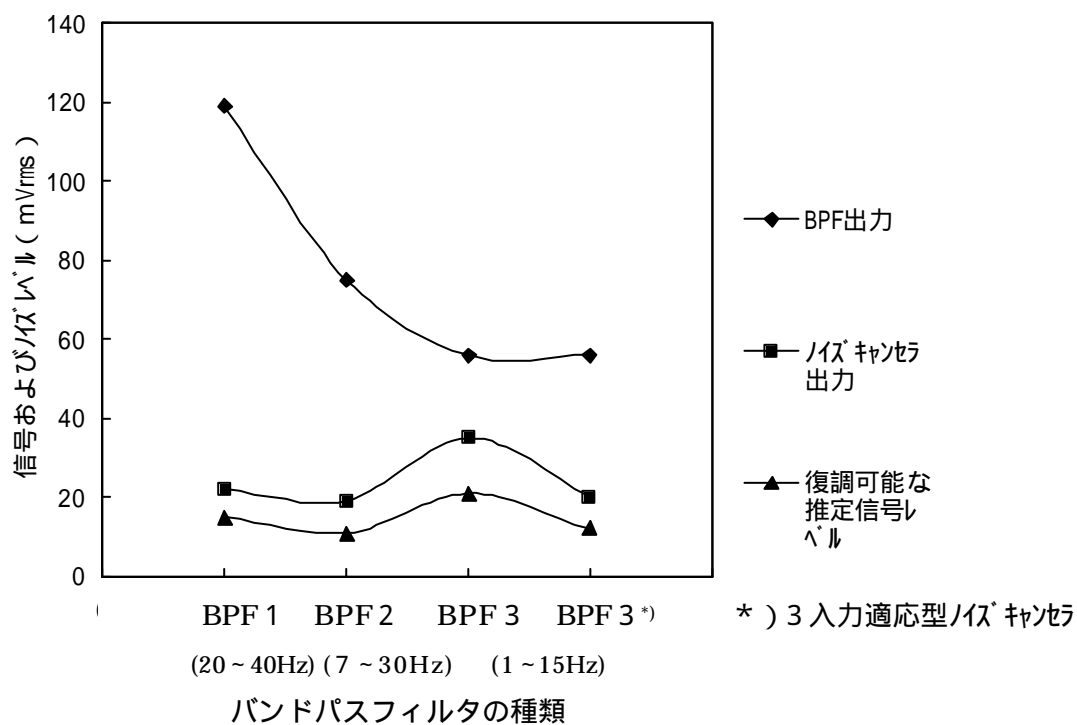


図 5 . 1 6 3 4 5 0 m掘削時のノイズキャンセル効果と復調可能な信号レベルの推定

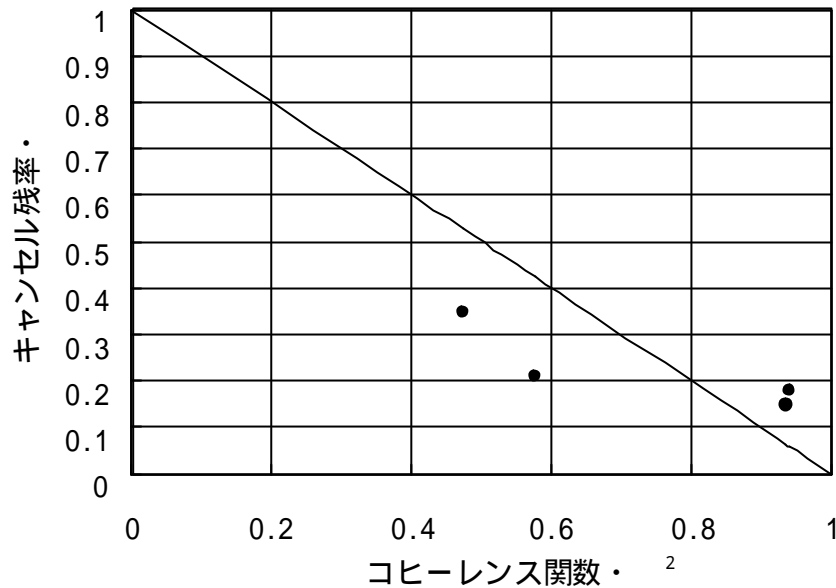


図5．17 2入力適応型ノイズキャンセラの性能

(2) 伝送実験

表5．6に伝送実験で収集した伝送深度と搬送周波数における地上での受信信号レベルとノイズレベルを示す。SN比が0 dB以下になったのは深度3330mの時で、それ以外の深度1275m以下では16 dB以上のSN比が確保でき、送信した全ての搬送周波数(3、10、30 Hz)において、全送信データを誤りなく復調することができた。

深度3330mでは、搬送周波数3 Hzを用いてノイズキャンセラを動作させて復調を開始したが、数十分後に坑底機器にトラブルが発生し送信が停止したため復調性能を評価できるデータは収集できていない。わずかな時間ではあるが、深度3330mの坑底より送信され地上で受信した受信信号波形の一例を図5．18に示す。

図5．19に伝送特性のシミュレーション結果と実験結果を示す。シミュレーション結果と伝送実験結果はほぼ一致していると考えて差し支えない。この結果を基に、地層の平均導電率が0.6 S/mのときの伝送特性を推定する。受信信号の復調限界レベルを20～30 μVとすると(図5．16参照。復調のSN比の限界を-3 dBとする。)、図5．19に示すシミュレーション結果から、搬送周波数に3 Hzを用いたときの伝送深度の限界は、同図に破線で示すように約3000mと推測できる。

表 5 . 6 伝送実験データ

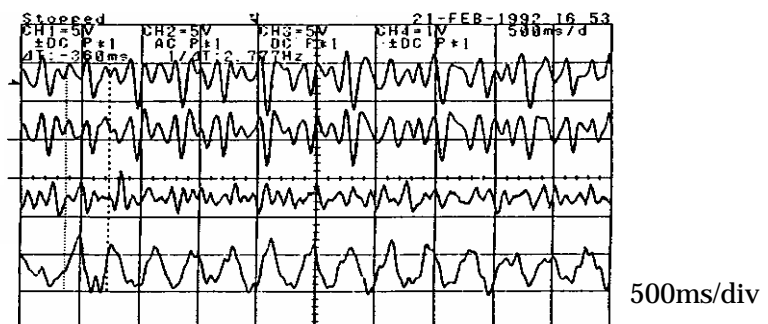
伝送深度(m) (地層の導電率 (S / m))	搬送 周波数 (Hz)	受信信号レベル		受信信号の SN 比 (dB)
		伝送信号 (mV _{p-p})	ノイズ (μ V _{rms})	
8 3 0 (0 . 0 8)	3	2 9 0	2 0 0	5 1
	5	3 2 0	2 0 0	5 2
	1 0	2 7 0	2 0 0	5 1
	2 0	1 9 0	2 0 0	4 8
	3 0	1 4 0	2 0 0	4 5
1 2 7 5 (0 . 1 3)	3	6 1	2 0 0	3 8
	5	4 9	2 0 0	4 6
	1 0	3 0	2 0 0	3 1
	2 0	1 3	2 0 0	2 4
	3 0	5	2 0 0	1 6
3 3 3 0 (0 . 3 5)	3	? 0 . 2	? 1 2 6	? - 3

(a) 受信アンテナ

(b) ノイズ 参照信号検出器
(PCT)

(c) 地電流

(d) キャンセル結果
(受信信号波形 * 1)



* 1) 受信信号レベル : 約 2 0 0 μ V_{p-p}

図 5 . 1 8 受信信号とノイズキャンセル効果 (深度 : 3330m 搬送周波数 : 3 Hz)

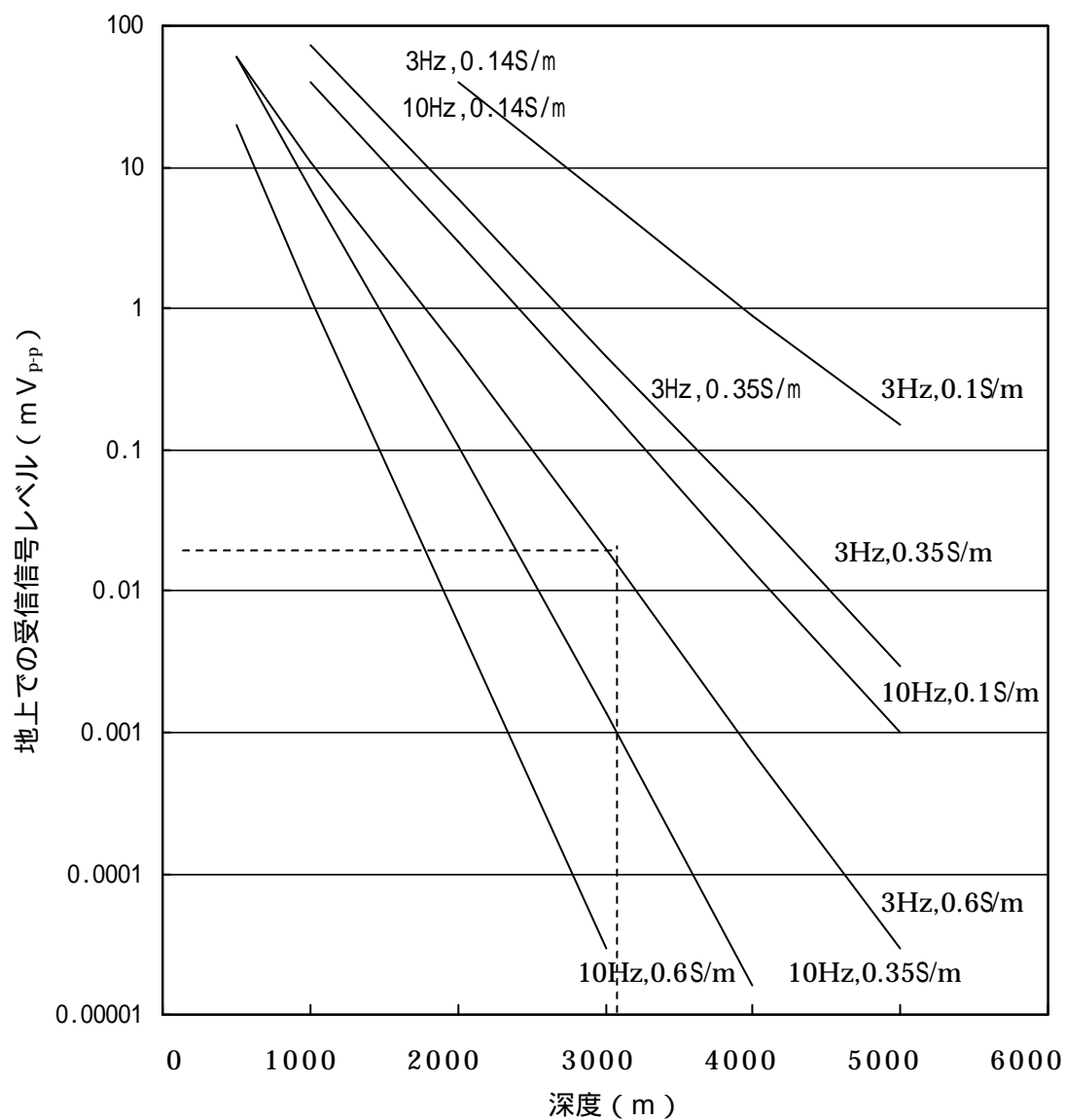


図 5 . 1 9 伝送特性 (シミュレーション結果 : 、 実験結果 :)

(3) オンライン復調結果

前述したように、深度 8 3 0 m ~ 1 2 7 5 m までは、表 5 . 7 に示すように受信信号の S N 比が 0 d B 以上確保できたため、坑底より伝送された全てのデータは正確に復調できた。

深度 3 3 3 0 m の場合は、坑底機器のトラブルで送信が停止したため復調試験が十分にできなかった。しかし、このときの受信信号 (図 5 . 1 8 (d)) より受信信号の S N 比が把握できた。よって、フィールドで収集したノイズデータに変調波信号を加算し、変調波

信号のSN比をフィールド実験レベルに設定した後、ノイズキャンセラを動作させて復調処理を行った。表5.7に復調結果を示す。ノイズキャンセラの有無が復調結果のビットエラーレートに顕著に現れ、その効果が明らかである。

表5.7 受信信号のノイズキャンセル効果と復調結果

*):(ビットエラーレート)=100-(ビットの認識率)%

深度 (m)	ビット波長 (波/ビット)	ノイズキャンセラ(ANC)あり		ノイズキャンセラ(ANC)なし	
		受信信号の SN比(dB)	同期検出時の ビットエラーレート(%)*	受信信号の SN比(dB)	同期検出時の ビットエラーレート(%)*
830	8			60	0.0(100/100)
~	16			~	0.0(100/100)
1275	32			30	0.0(100/100)
3330	8	-3	0.6(2/329)	-12	20(18/88)
	16	~	0.0(0/136)		9.7(6/62)
	32	-4	0.0(0/36)		4.2(1/24)

5.2.4 考察

(1) ノイズ調査とノイズキャンセル

掘削深度とノイズ特性およびノイズキャンセル量について考察した。その、結果以下の結論が得られた。

表5.5、図5.15および図5.16に示すノイズキャンセル特性によると、掘削深度が深くなるに従い、受信アンテナに混入するノイズの量の関係は減少する傾向にある。今回の実験では3450m掘削時のノイズレベルは2270m掘削時のノイズレベルに比べて20~50%程度低くなる。また、ノイズキャンセル量はノイズレベルに逆比例する傾向を示す。すなわち、受信アンテナに混入するノイズレベルが小さくなるとノイズ参照信号とのコヒーレンス相関が小さくなり、ノイズキャンセル効果が低下する。しかし、ノイズキャンセル処理した後のノイズレベルは深度に関係なく、概ね20~30μV_{rms}である。ノイズレベルが低くなる要因として次のことが考えられる。すなわち、掘削深度が深いところでは、岩盤が堅くなり掘進率が低下する傾向があり、周囲の環境変化にも敏感になりオペレータの掘削作業も丁寧になる。これにより、電気機器の負荷変動が小さくなるためノイズレベルが小さくなる。また、掘削リグ以外から発生するノイズやノイズ参照信号検出器(PCT)で検出できないノイズ成分が大きくなりノイズキャンセル量が期待できなくなる。しかし、これらのことは定量的に把握はできていない。

周波数帯域10~40Hzのノイズキャンセル効果は15dB以上実現し良好であっ

たが、1 Hz ~ 15 Hz 帯域においては、キャンセル量は9 dB 程度である。地電流ノイズを含めた3入力適応型ノイズキャンセラで約13 dB が確保できることが分かった。また、低周波になるほど原理上電磁波の伝送特性が良好になることは明らかで（減衰が少ない）実験データによると低周波になるとキャンセル量は期待できないが、ノイズレベルも低くなる傾向が見られるので、受信信号のSN比は10 Hz 以上の帯域と同等のものが得られることが期待できる。

（２）伝送実験

伝送信号の受信レベルは、概ねシミュレーション結果と一致した。

復調機能を含めた伝送性能を検証した。受信信号レベルとSN比およびビット認識率を表5.8にまとめる。

SN比が-3 ~ -4 dB において、8波/ビットのビット認識率は99.5%であった。また、16波/ビットのビット認識率は100%であった。この結果は、表3.2に示す受信信号のSN比と認識率の変復調シミュレーション結果とほぼ一致している。

表5.8 ビットの認識率

送信深度 (m)	搬送周波数 (Hz)	ビットの波数 (波/ビット)	受信信号の SN比(dB)	最大ビットレート (ビット/秒)	ビットの認識率 (%)
830	3 ~ 30	8	63 ~ 57	3.75	100
1275	3 ~ 30	8	50 ~ 28	3.75	100
3330	3	8	-3 ~ -4	0.37	99.5
		16		0.18	100

5.3 掘削伝送実験

5.3.1 目的

本検証実験では、実際に掘削しながら坑底環境データを伝送し、5.2節で行った電磁波の伝送特性および信号処理性能を評価する。本実験は「基礎試錐・新竹野町」で実施した。

5.3.2 実験機器

坑底機器は図4.6に示す編成で、地上機器は図4.5および図4.11に示す構成である。掘削現場での受信アンテナ、ノイズ参照信号検出器（PCT）および地電流検出用アンテナの配置を図5.20に示す。受信アンテナの電極間距離は約88mである。地電流検出用アンテナの電極間距離は約176mである。

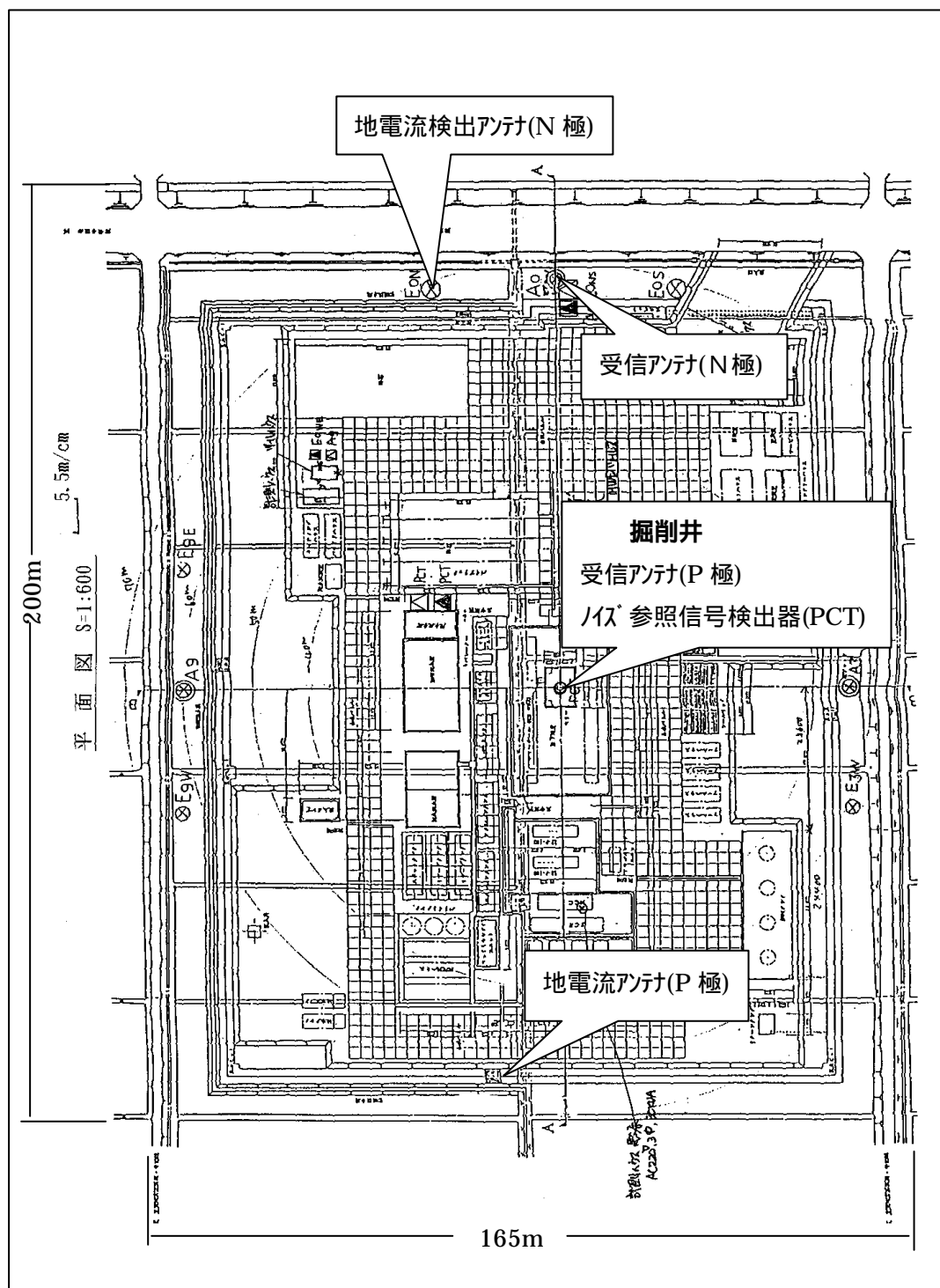


図5.20 掘削フィールドでの機器の配置

9 0

9 6